

Новый метод управления активным распределением мощности в распределительных микросетях на основе возобновляемых источников энергии

Вазль Дж. АБДАЛЛА¹, Хуррам ХАШМИ^{2,3}, Мухаммад Талиб ФАИЗ⁴, Аймен ФЛЭХ⁵,
Ситтипорн ЧАННУМСИН⁶ ✉, Мохамед А. МОХАМЕД⁷ ✉, Д.А. УСТИНОВ¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Инженерно-технологический университет, Лахор, Пакистан

³ Университетский колледж Дублина, Дублин, Ирландия

⁴ Гонконгский политехнический университет, Цзюлун, Гонконг, Китай

⁵ Национальная инженерная школа при университете Габеса, Университет Габеса, Габес, Тунис

⁶ Центр космических исследований и технологий, Агентство по развитию геоинформатики и космических технологий, Чонбури, Таиланд

⁷ Университет Миниа, Эль-Минья, Египет

✉ sittiorn@gistda.or.th (Ситтипорн Чаннумсин); dr.mohamed.abdelaziz@mu.edu.eg (Мохамед А. Мохамед)

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Abdallah, W.J.; Hashmi, K.; Faiz, M.T.; Flah, A.; Channumsin, S.; Mohamed, M.A.; Ustinov, D.A. A Novel Control Method for Active Power Sharing in Renewable-Energy-Based Micro Distribution Networks. *Sustainability* 2023, 15, 1579. <https://doi.org/10.3390/su15021579>

Аннотация: Микросети – это развивающаяся тенденция в современных энергосистемах. Микросети состоят из управляемых источников энергии, накопителей и нагрузок. Для регулирования и синхронизации взаимодействия этих компонентов создается развитая инфраструктура управления. Схема управления делится на иерархию из нескольких уровней, где каждый уровень состоит из мультиагентов, выполняющих свои функции для согласования управляющих воздействий по корректирующим значениям. Боковое и горизонтальное взаимодействие таких мультиагентов формирует комплексную иерархическую структуру управления, которая регулирует работу микросети для достижения целого ряда целей, включая распределение мощности, регулирование напряжения и частоты. Успех схемы управления на основе мультиагентов зависит от исправности средств связи, используемых для передачи измерений и управляющих сигналов. Задержки в передаче управляющих сигналов приводят к общему ухудшению эффективности управления и нарушению устойчивой работы элементов микросети. В данной работе предлагаются новые мультиагентные скользящие средние оценки для смягчения эффекта латентных каналов связи и создается иерархическая схема управления, включающая эти средние оценки для получения точных значений системы во время задержек связи. Для проверки устойчивости предложенного метода по сравнению с традиционными методами, основанными на согласовании управляющих воздействий, построены математические модели для всей микросеточной системы. Имитационные исследования на конкретных примерах и экспериментальная проверка в лабораторных условиях подтверждают эффективность и превосходство предложенной схемы управления по сравнению с другими традиционными методами управления.

Ключевые слова: силовая электроника; управление микросетями; распределительные сети; силовая электроника.

A Novel Control Method for Active Power Sharing in Renewable-Energy-Based Micro Distribution Networks

Wael J. ABDALLAH¹, Khurram HASHMI^{2,3}, Muhammad Talib FAIZ⁴, Aymen FLAH⁵,
Sittiporn CHANNUMSIN⁶ ✉, Mohamed A. MOHAMED⁷ ✉ and Denis A. USTINOV¹

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² University of Engineering and Technology, Lahore, Pakistan

³ School of Electrical and Electronic Engineering, University College Dublin, Dublin, Ireland

⁴ The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong, China

⁵ National Engineering School of Gabes, University of Gabes, Gabes, Tunisia

⁶ Space Technology Research Center, Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA), Chonburi, Thailand

⁷ Minia University, Minia, Egypt

✉ sittiorn@gistda.or.th (Sittiporn Channumsin); dr.mohamed.abdelaziz@mu.edu.eg (Mohamed A. Mohamed)

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

Abstract: The microgrid is an emerging trend in modern power systems. Microgrids consist of controllable power sources, storage, and loads. An elaborate control infrastructure is established to regulate and synchronize the interaction of these components. The control scheme is divided into a hierarchy of several layers, where each layer is composed of multi-agents performing their dedicated functions and arriving at a consensus of corrective values. Lateral and horizontal interaction of such multi-agents forms a comprehensive hierarchical control structure that regulates the microgrid operation to achieve a compendium of objectives, including power sharing, voltage, and frequency regulation. The success of a multi-agent-based control scheme is dependent on the health of the communication media that is used to relay measurements and control signals. Delays in the transmission of control signals result in an overall deterioration of the control performance and non-convergence. This paper proposes novel multi-agent moving average estimators to mitigate the effect of latent communication links and establishes a hierarchical control scheme incorporating these average estimators to accurately arrive at system values during communication delays. Mathematical models are established for the complete microgrid system to test the stability of the proposed method against conventional consensus-based methods. Case-wise simulation studies and lab-scale experimental verification further establish the efficacy and superiority of the proposed control scheme in comparison with other conventionally used control methods.

Keywords: smart-grid; microgrid control; distribution networks; power electronics.

1. Введение

Объекты распределенной генерации (ОРГ) на основе возобновляемых и устойчивых источников энергии (ВИЭ) имеют переменную мощность, поскольку ВИЭ имеют стохастическую природу. ОРГ, блоки хранения энергии (БХЭ), гибридные электромобили (ГЭМ), центры сбора данных (ЦСД), стратегии диспетчерского управления, локальные и централизованные структуры управления образуют структуру управления микрораспределительной сетью, которая управляет микросетью [1, 2]. Интеллектуальная микрораспределительная сеть или микросеть (МС) может быть описана как автономная сеть передачи и распределения энергии, способная к саморегулированию. Основная задача МС – удовлетворить требования подключенной нагрузки за счет эффективного управления ресурсами генерации, хранения и передачи энергии. Таким образом, она может стать эффективным решением для интеграции и использования возобновляемых источников энергии [3-5].

Силовые преобразователи обрабатывают переменный выходной сигнал от ВИЭ и регулируют напряжение и токи с помощью локальных контуров управления. Для распределения мощности между различными узлами используются «первичные» регуляторы [6]. В литературе обсуждается несколько методов разделения мощности, таких как оптимизированное управление на основе связи, P-f, Q-V понижения характеристики управления, пропорционального понижения характеристики управления и так далее [6-8]. В литературе широко используются децентрализованные схемы управления с понижением характеристики управления, и в этих методах отмечается пропорциональное снижение частоты и напряжения за счет ошибок распределения активной и реактивной мощности в каждом распределительном узле. В базовые методы понижения мощности было внесено несколько изменений, чтобы устранить ограничения обычного понижения мощности и достичь большей точности распределения мощности. Однако ограничения традиционного управления понижением приводят к несоответствию выходного напряжения и частоты их номинальным значениям. Вторичный восстанавливающий слой управления наблюдает и корректирует отклонения частоты и напряжения, чтобы достичь номинального диапазона этих параметров [6, 9-16].

Схемы управления на основе согласования управляющих воздействий наблюдатели используют для сближения оценок значений, измеренных на распределительных узлах, наряду с восстановлением синхронизации напряжения и частоты [1, 6, 17]. Эти схемы опираются на передачу данных в схеме управления. Такие методы могут быть использованы как в централизованной, так и в распределенной иерархической системе управления. Централизованные схемы управления направлены на достижение разделения мощности в системе МС путем использования двунаправленной структуры связи с центральным регулятором.

Гибкость децентрализованных методов управления для новых и инновационных схем управления в виде мультиагентных систем обсуждается в [6, 8, 18-22]. Такие методы управления

могут объединять ресурсы каждого агента узла для содействия сближению с конкретным заданным значением. В подобных сценариях управление МС и ее работа могут быть реализованы путем превращения отдельного силового преобразователя в агента в рамках более крупной мультиагентной системы. В работах [8, 23, 24] системные цели МС, такие как восстановление напряжения и частоты сети и распределение мощности, рассматриваются как проблемы синхронизации контролируемых параметров, и все участвующие узлы системы прилагают усилия для достижения согласования управляющих воздействий в отношении корректирующих значений.

Контроль и управление микросетью можно представить как многоуровневую систему управления. В этой структуре управления нулевой уровень отвечает за контроль тока и напряжения, первичный – регулирует распределение мощности, вторичный – регулирует отклонения частоты и напряжения. Третичный контроль выполняет функции управления энергией [18, 25-27]. Вторичное управление работает по принципу согласования управляющих воздействий между всеми участвующими узлами, что делает восстановление напряжения и частоты задачей синхронизации контролируемых параметров. Структура управления на основе согласования управляющих воздействий может быть пригодна для реализации совместного использования мощности между контрольными узлами [28]. Распределение реактивной мощности также может быть реализовано на первичном уровне управления с помощью методологии распределенного управления, которая также способна регулировать напряжение [29, 30]. Устойчивость системы МС изучается в литературе с помощью моделирования малых сигналов с распределенной схемой управления для реализации целей управления сетью переменного тока [17], что позволяет заменить вторичную централизованную структуру управления и первичный регулятор на основе дросселя. Для регулирования различных параметров сети переменного тока, таких как напряжение системы, были разработаны регуляторы активной и реактивной мощности.

Традиционные системы управления на основе согласования управляющих воздействий в значительной степени зависят от эффективности каналов связи [7, 31]. Быстрая передача измеренных, расчетных и управляющих сигналов приводит к раннему сближению контролируемых параметров и улучшает возможности регулирования, но такие ограничения, как скрытая сеть связи и прерывистость, ухудшают устойчивость и эффективность управления микросетью. Однако, чтобы сохранить простоту управления и облегчить постановку задачи, в литературе была принята безотказная сеть связи без нарушенных или скрытых линий связи [18, 25, 26, 29, 32]. Характеристики информационной сети, продемонстрированные в этих подходах к управлению, являются инвариантными по времени. В работах [17, 28, 33-36] исследователи рассматривали коммуникационную сеть с неисправностями, чтобы можно было проанализировать работу регулятора в таких сценариях.

В сетевых энергетических системах вероятны некоторые сбои связи на уровне систем управления и передачи данных. Передача данных и мультиагентное управление на основе согласования управляющих воздействий могут пострадать из-за задержек в обмене информацией, что ухудшит производительность системы МС. Для решения этих проблем необходимы рациональные и инновационные схемы управления.

В данной работе представлена усовершенствованная методика управления, учитывающая скрытые каналы связи в многоуровневой схеме управления для островной микросети (МС) переменного тока. Для реализации активного распределения мощности в микросети между всеми распределительными узлами в данном исследовании была предложена новая техника распределения мощности. Степень устойчивости к задержкам связи в сети достигается за счет оценки средних параметров МС на каждом узле. Для проверки жизнеспособности и эффективности предложенной структуры управления были проведены всесторонний математический анализ и детальное моделирование, а также приведены результаты, подтверждающие правильность предложенного метода. Для восстановления напряжения и частоты к вторичному управлению

сетью переменного тока был добавлен слой управления согласующих воздействий на основе мультиагентного подхода.

Основной вклад и преимущества данного исследования могут быть обобщены следующим образом:

1. Предложена новая распределенная мультиагентная методика оценки скользящего среднего, которая предварительно оценивает измеренные значения в каждом узле.
2. Принята иерархическая распределенная структура управления, которая включает в себя мультиагентный метод скользящего среднего, предложенный в данной работе, для достижения активного распределения мощности и регулирования общесистемных значений напряжения и частоты.
3. Жизнеспособность и эффективность исследуемого подхода проверена для сценариев, в которых поддержание заданных параметров микросети зависит от задержек в каналах связи.

Данная работа построена следующим образом: формулировка задачи, а также особенности модели МС переменного тока, рассматриваемой в данной работе, обсуждаются в разделе 2. В разделе 3 описывается предлагаемая иерархическая схема управления. В разделе 4 описаны наблюдатели, основанные на управлении согласующих воздействий. В разделе 5 представлены схемы управления восстановлением напряжения и частоты. В разделе 6 приведен вывод математической модели для указанной структуры управления. В разделе 7 представлен анализ устойчивости предложенной схемы управления в сравнении с существующим методом, основанным на управлении согласующих воздействий, а в разделе 8 – оценка эффективности системы МС с помощью имитационного моделирования. В разделе 9 приведены экспериментальные результаты, полученные для проверки предложенного метода. В разделе 10 проводится сравнение предложенного метода с традиционными методами, основанными на управлении согласующих воздействий. Наконец, в разделе 11 подводятся итоги работы.

2. Материалы и методы: формулировка задачи

В этом разделе представлены математические модели, необходимые для разработки задачи управления. Микросеть можно представить как две наложенные друг на друга системы, а именно: сеть электроснабжения и сеть управления и связи. Каждый отдельный РЭС может быть принят за участвующий узел в мультиагентной микросети. Чтобы сформулировать проблему и представить новые схемы управления, систематически описываются теории компонентов с помощью основных понятий теории графов и математическая модель устойчивого состояния энергосистемы с основной математической формулировкой. В качестве предисловия к работе в следующем параграфе приведено краткое объяснение задержек каналов связи.

2.1. Описание микросети

В данной работе используется трехфазная, трехпроводная радиальная распределительная сеть, показанная на рисунке 1. Как видно, преобразователи мощности на шинах с 1 по 4 соединены с индукторами связи и LC-фильтрами. Изменяющиеся нагрузки RL подключены к шинам с 2 по 4. Шина 1 не питает нагрузку. Шина 5 обеспечивает точку соединения, которая является общей с энергосистемой. Система МС может управляться независимо в «островном» режиме. Номинальные параметры системы МС представлены в таблице 1, а нагрузки системы – в таблице 2.

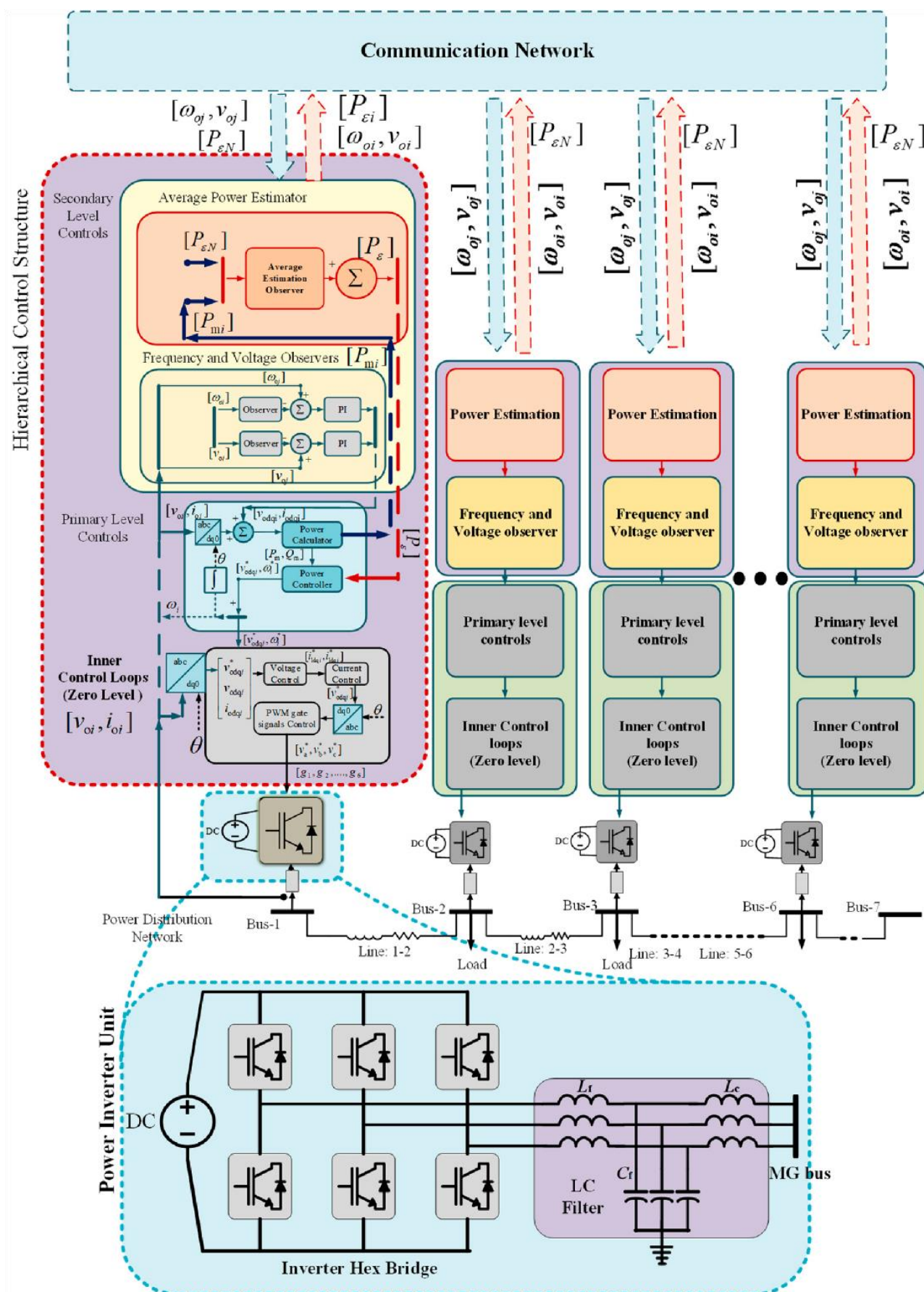


Рис. 1. Сеть управления и распределения электроэнергии микросети переменного тока

Таблица 1

Параметры микросети

Параметр	Значение	Параметр	Значение
L_f	1,35 мГн	m_p	$4,4 \times 10^{-6}$
R_f	0,1 Ом	n_q	$1,1 \times 10^{-6}$
C_f	25 мкФ	k_{pf}	0,4
L_c	1,35 мГн	k_{if}	0,5
R_c	0,05 Ом	k_{pv}	0,6
R_{line}	0,2 Ом	k_{iv}	0,3
L_{line}	0,6 мГн	F	0,6
f_{nom}	50 Гц	ω_c	31,4
V_{nom}	380 В		

Таблица 2

Нагрузки на систему

Шина No.	Подключаемые нагрузки (о.е.)	
	P	Q
1	0	0
2	0,3	0,3
3	0,25	0,25
4	0,25	0,25
5	0	0

Реактивная и активная мощности, вводимые отдельной распределенной системой, могут быть выражены в уравнениях (1) и (2), соответственно. Простая модель стационарного состояния электрической сети представлена в уравнении (3). Y_{busMG} представляет собой матрицу коэффициента передачи шины для распределительной системы

$$P_i = \sum_{k=1}^N |Y_{ik} V_i V_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (1)$$

$$Q_i = -\sum_{k=1}^N |Y_{ik} V_i V_k| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (2)$$

$$[Y_{busMG}] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \\ I_{s4} \\ I_{s5} \end{bmatrix} \quad (3)$$

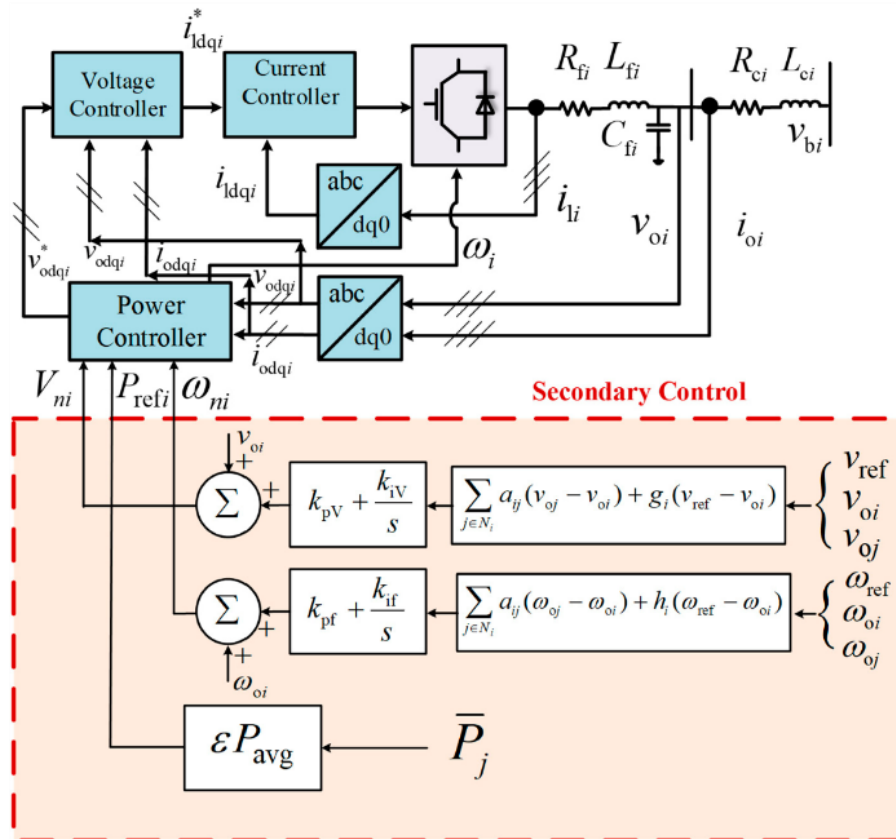
где $|Y_{ik}|$ показывает пропускную способность, связанную между i -й и k -й шинами, в то время как $|V_i|$ представляет величину напряжения на конкретном i -м инверторе, а $|V_k|$ – величину напряжения на конкретной k -й шине; θ_{ik} представляет угол рассогласования между i -й и k -й шинами, δ_k представляет собой угол напряжения на k -й шине, а δ_i – угол напряжения на i -й шине.

2.2. Иерархические системы контроля и киберсеть

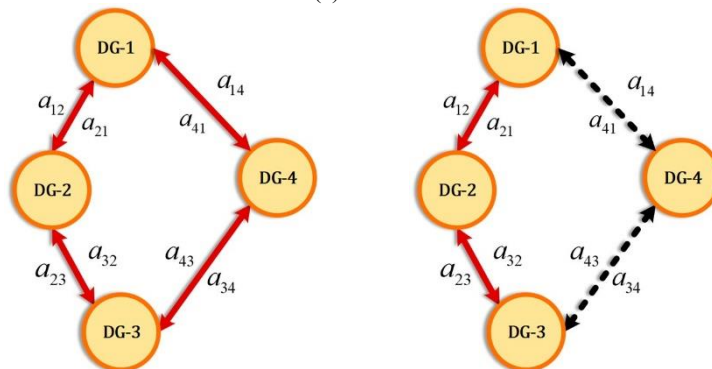
На рисунке 1 представлено графическое изображение многоуровневого иерархического управления всей системой микросети. Элементы управления нулевого уровня локализованы в каждом узле и регулируют напряжения и токи для каждого силового преобразователя. Над ними находится первичное управление, которое управляет распределением мощности на основе модифицированной мультиагентной методики с коэффициентом регулятора мощности, принятым как (m_p^*, n_q^*) . Вторичное/третичное управление находится над первичным и вторичным слоями и содержит наблюдатели для значений мощности, напряжения и частоты, которые вычисляют вышеупомянутые ограничения на основе данных от окружающих агентских узлов ($U_{k \in N \omega_{oi}}$, $U_{k \in N V_{oi}}$, $U_{k \in N P_{ei}}$). Корректирующие условия генерируются вторичными регуляторами для значений мощности, подаваемой на нагрузку, напряжения и частоты (P_{refi} , ω_{ni} , V_{ni}).

2.2.1. Теоретико-графическая формулировка

Измеренные величины и соответствующие управляющие сигналы передаются через уровень коммуникационной сети, как показано на рисунке 2а, который можно представить в виде ориентированного графа $\Psi = (\Phi_g, E_g, A_g)$, состоящего из конечного множества N агентов, расположенных в вершинах, определенных как $\Phi_g = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N\}$. Дуги, соединяющие распределенные вершины, представлены в виде $E_g \subset \Phi_g \times \Phi_g$. Матрица смежности может быть описана как $A_g = [a_{ij}] \in R^{N \times N}$. Для структуры микросети узлы агентов описывают системные узлы ориентированного графа, а соединяющие их коммуникационные сети могут быть представлены в виде дуг [37]. На рисунке 2а показана связь между вторичными и первичными органами управления отдельных узлов. Корректирующие условия для напряжения и частоты (V_{nj}, ω_{nj}) были произведены наблюдателем для достижения требуемых уровней напряжения и частоты (v_{ref}, ω_{ref}) , а также поправочных оценок для напряжения и частоты (v_{oj}, ω_{oj}) . Кроме того, (P_{refi}) вычисляет среднее значение на основе средних значений мощности $\varepsilon (P_{avg})$, как показано далее в математическом анализе, представленном в разделе 3.



(a)



(б)

(в)

Рис. 2. Представление схемы распределенного управления. (а) Вторичное регулирование; (б) Полностью связанная двунаправленная структура связи; (в) Частично связанная структура связи с задержками

Рассматривается стабильная, не изменяющаяся во времени сеть связи, как показано на рис. 2b. Для упрощения процесса оценки можно пренебречь шумами передачи. Инвариантный по времени ориентированный граф представляет коммуникационную сеть, то есть A_g считается константой для каждого этапа эксперимента и моделирования. Дуга, исходящая из узла j и направленная к узлу i , может быть представлена как (φ_j, φ_i) ; узел j собирает данные с узла i . Вес a_{ij} представляет собой силу связи, соединяющей v_i с v_j , и $a_{ij} > 0$ если $(\varphi_j, \varphi_i) \in E_g$. Набор соседних узлов с i -м узлом v_i можно представить в виде $N_i = \{\varphi_j \in V_g : (\varphi_j, \varphi_i) \in E_g\}$. Матрица Лапласиана может быть определена как $\Lambda_g = (l_{ij})_{N \times N}$, где $l_{ij} = -a_{ij}$, $i \neq j$ и $l_{ii} = \sum_{j=1}^N a_{ij}$ для $i = 1, \dots, N$, так, что $\Lambda_{1N} = 0$ при $1_N = (1, \dots, 1)^T \in R^N$. Матрица степеней может быть представлена в виде $D_g^{in} = \text{diag}\{d_i^{in}\}$, где $d_i^{in} = \sum_{j \in N_i}(a_{ij})$, а матрица вне степени в виде $D_g^{out} = \text{diag}\{d_i^{out}\}$, где $d_i^{out} = \sum_{i \in N_i}(a_{ij})$.

В сети управления используется функция мультиагентного наблюдателя, заставляющая контролируемые параметры системы x сходиться с некоторой задержкой, которая может быть выражена в виде уравнений (4) и (5):

$$\dot{x} = -C(D_g - A_g)x = -C\Lambda_g x \quad (4)$$

где

$$\Lambda_g = D_g - A_g \quad (5)$$

Кроме того, Λ_g – это матрица Лапласиана, рассчитанная для структуры связи, которая зависит от матрицы смежности A_g и матрицы степеней D_g . Состояния системы представлены через x , а $\dot{x}$ обозначает вектор, содержащий значения, полученные в результате работы алгоритма управления согласующих воздействий. Коэффициент сходимости обозначается C , и его значение зависит от параметров сети [38]. Матрицы Λ_g , D_g и A_g , используемые для модели связи, показаны в приложениях В.1-В.3, соответственно.

2.2.2. Задержки в каналах киберсети

В данном исследовании рассматривается система связи. Из-за наличия сетевых задержек три участвующих узла подвергаются непосредственному влиянию (т. е. ОРГ 1, 3 и 4), как показано на рисунке 3с. Коммуникационные каналы, представленные пунктирными линиями, испытывают задержки, а ОРГ считаются от 1 до 4. На ОРГ 4 оказывает двойное влияние ухудшение качества связи. Задержки каналов связи для сетевой системы управления можно выразить в виде уравнения (6):

$$\left. \begin{aligned} x_p(k+1) &= A.x_p + B.u_p \\ y_p &= C.x_p \\ y_p &= y_c(k - t_d) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где матрицы A , B и C выражают матрицы пространства состояний сетевой системы управления в дискретном времени, x_p – вектор состояния системы, принятый при моделировании, а u_p и y_p – вход и выход системы, соответственно [39]. В данной работе задержка связи была аппроксимирована как равномерная единичная задержка t_d [38]. Величина временной задержки изменялась дискретными равными шагами, так что увеличение задержки для различных сценариев может быть эмулировано.

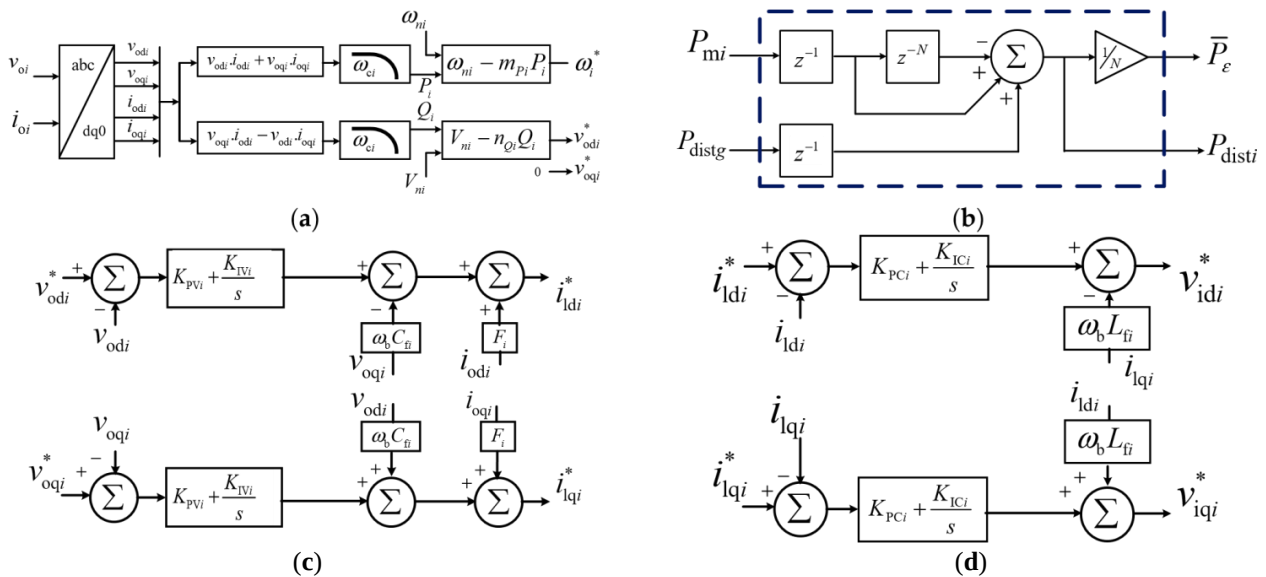


Рис. 3. Уровни управления. (а) Регулятор мощности (первичное управление); (б) Распределенный мультиагентный скользящий средний оценщик мощности (вторичное управление); (с) Контур управления напряжением (управление нулевым уровнем); (д) Контур управления током (управление нулевым уровнем)

3. Распределенное мультиагентное управление на основе скользящего среднего

В этом разделе описывается предлагаемый метод управления для оценки распределенных значений контролируемых параметров и распределения активной мощности. В разделе 3.1 приводится обзор метода, а в разделе 3.2 – подробное описание предлагаемых оценочных средств.

3.1. Обзор метода оценки мощности

Для управления мощностью разработана и представлена новая методика управления. Учитывая концепции фильтров с конечным и бесконечным импульсным откликом (IIR и FIR) [40], на каждом ОРГ были реализованы распределенные мультиагентные оценщики скользящего среднего, которые описаны на рисунках 2а и 3б. Все участвующие ОРГ вычисляют среднюю оценку системы по значениям параметров, полученным от соседнего агента. Оценки средней мощности рассматриваются в качестве корректирующего члена для локализованного управления понижением мощности с помощью уравнения (7), где частота уменьшается пропорционально для соответствующего распределения активной мощности. Как показано на рисунке 3а, уравнения (8) и (9) описывают работу регулятора понижения. Кроме того, $x_{m1} - x_{mN}$ представляют локально измеренные значения, в то время как $x_1 - x_N$ представляют средние оценки, а термин z^{-1} представляет собой задержку единицы передачи на один цикл обработки.

$$\omega_i^* = \omega_i - m_{pi}(P_{mi} - \bar{P}_i) \quad (7)$$

$$x_i(k+1) = \frac{x_{mi}(k-1) - x_{mi}(k-(N+1)) + x_{distg}(k-1)}{N} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta x_{mi} = x_{mi}(k-1) - x_{mi}(k-(N+1)) \\ x_{disti} = \Delta x_{mi} + x_{distg}(k-1) \\ x_i(k+1) = \frac{\Delta x_{mi} + x_{distg}(k-1)}{N} \end{cases} \quad (7)$$

N представляет собой количество участвующих узлов в сети, i обозначает узел, который рассматривается в данный момент. Обмен средней мощностью представлен x_{dist} внутри узлов: полученная средняя мощность от соседних подключенных узлов показана x_{distg} , а передаваемая средняя мощность от узла i представлена как x_{disti} . При применении предложенного метода, все узлы сходятся к «скользящему среднему» значению, основанному на оценках, полученных от соседних узлов.

3.2. Распределенный метод оценки передаваемой мощности

Если локальные измеренные значения активной мощности в узле i обозначаются x_{mi} , где $x_{mi} = [P_{mi}]$, то оценка всей передаваемой активной мощности, вычисленная на соседних узлах, задается как x_{distg} , где $x_{distg} = [P_{disti}]$.

Для системы, состоящей из N узлов ОРГ, с мультиагентным наблюдателем со скользящим средним, как показано на рисунке, в матричном представлении уравнения могут быть записаны следующим образом

$$\begin{bmatrix} x_{dist1}(z) \\ x_{dist2}(z) \\ \vdots \\ x_{distN}(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{m1}(z) \\ x_{m2}(z) \\ \vdots \\ x_{mN}(z) \end{bmatrix} z^{-1}(1 - z^{-N}) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & z^{-1} \\ z^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z^{-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{dist1}(z) \\ x_{dist2}(z) \\ \vdots \\ x_{dist(N-1)}(z) \end{bmatrix} \quad (10)$$

где матрицы имеют вид

$$\begin{aligned} [x_m]_{N \times 1} &= \begin{bmatrix} x_{m1}(z) \\ x_{m2}(z) \\ \vdots \\ x_{mN}(z) \end{bmatrix}; [x_{dist}]_{N \times 1} = \begin{bmatrix} x_{Tdist1}(z) \\ x_{Tdist2}(z) \\ \vdots \\ x_{TdistN}(z) \end{bmatrix}; \\ [Z]_{N \times N} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & z^{-1} \\ z^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z^{-1} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, мы можем записать вышеупомянутую систему в виде:

$$[x_{\text{dist}}] = [Z][x_{\text{dist}}] + [x_m]z^{-1}(1 - z^{-N}) \quad (12)$$

Можем написать:

$$[x_{\text{dist}}] - [Z][x_{\text{dist}}] = [x_m]z^{-1}(1 - z^{-N}) \quad (13)$$

Упрощая, распределенную оценку мощности можем представить в виде:

$$x_{\text{dist}i} = \sum_{i=0}^N (x_{mi}) \quad (14)$$

Величина мощности, потребляемой в любом узле системы, может быть оценена как

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{i=0}^N (x_{\text{dist}i})}{N} \quad (15)$$

где $x_i = P_i$ дает оценку активной мощности, передаваемой в i -м узле. Общее количество узлов равно N . Из приведенного выше анализа следует, что предложенный метод может оценить мощность, потребляемую каждым узлом в системе.

4. Распределенное управление на основе управления согласующих воздействий

В [17, 41] для сравнения была описана техника управления согласующих воздействий, зависящая от наблюдателя, которая вычисляет среднюю передаваемую мощность $\bar{x}_i = [\bar{P}_i]$, путем наблюдения за предыдущими и текущими соседскими измерениями:

$$x_i(t) = x_i(t) + \int_0^t \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\bar{x}_j(\tau) - \bar{x}_i(\tau)) \cdot d\tau \quad (16)$$

Уравнение (16) можно дополнительно модифицировать, учитывая задержки в сети связи t_d , в дополнение к весовым коэффициентам в матрице смежности a_{ij}

$$x_i(t) = x_i(t) + \int_0^t \sum_{j \in N_i} a_{ij}\bar{x}_j(\tau - t_d) - \bar{x}_i(\tau) \cdot d\tau \quad (17)$$

При рассмотрении производных по времени, динамику системы можно описать в виде:

$$\dot{\bar{x}}_i = \dot{x}_i + \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\bar{x}_j(t - t_d) - \bar{x}_i) = \dot{x}_i + \sum_{j \in N_i} a_{ij}\bar{x}_j(t - t_d) - d_i^{\text{in}} x_i \quad (18)$$

При дальнейшем упрощении получаем:

$$\bar{x}_i = \dot{x}_i + A_g \cdot \bar{x}_j(t - t_d) - D_g^{\text{in}} \cdot \bar{x}_i \quad (19)$$

где уравнение (19) представляет собой структуру системы управления согласующих воздействий наблюдателей на основе динамики наблюдателей; $x_i = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ представляет собой вектор измеренной мощности во всех соединенных узлах, а $\bar{x}_i = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N]^T$ есть вектор оценочной мощности, который достигается путем усреднения структуры системы управления согласующих воздействий. С помощью преобразования Лапласа эти уравнения можно могут быть преобразованы в частотную область как:

$$s\bar{X}_i = sX_i + sA_g \cdot e^{-t_d s} \cdot \bar{X}_j - D_g^{\text{in}} \bar{X}_i \quad (20)$$

С помощью математических манипуляций мы можем получить:

$$\bar{X} = s(sI_N + A_g e^{-t_d s} - D_g^{\text{in}})^{-1} X = H_{\text{obs}} X \quad (21)$$

где $I_N \in \mathbb{R}^{N \times N}$ – матрица тождества, а H_{obs} – передаточная функция наблюдателя. Если интервал времени мал (т.е. $t_d \rightarrow 0$), то $e^{t_d s} \rightarrow 1$. Уравнение (22) может быть выражено как:

$$\bar{X} = s(sI_N + A_g - D_g^{\text{in}})^{-1} X \quad (22)$$

При дальнейших упрощениях получаем:

$$\bar{X} = s(s\mathbf{I}_N + \mathbf{\Lambda}_g)^{-1}X \quad (23)$$

где матрица Лапласиана может быть записана в виде $\mathbf{\Lambda}_g = \mathbf{D}_g - \mathbf{A}_g$. Если $\mathbf{\Lambda}_g$ – сбалансированная матрица, то компоненты их удовлетворяют требованиям глобального эталона, который представляет оценки усредненной мощности.

5. Восстановление напряжения и частоты

На вторичном уровне регулирование напряжения и частоты достигается с помощью управления согласующих воздействий соседнего элемента [35]. Восстановление напряжения вместе с подходом распределенного регулирования частоты показано на рис. 2а. Математическая формулировка метода регулирования частоты приведена в уравнении (24).

$$\begin{cases} \delta\omega_i(k+1) = k_{pf}e_{\omega i}(k) + k_{if} \sum_{i=ko}^k e_{\omega i}(k) \\ e_{\omega i}(k+1) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\omega_{oj}(k) - \omega_{oi}(k)) + h_i(\omega_{ref}(k) - \omega_{oi}(k)) \end{cases} \quad (24)$$

где номинальная частота, служащая в качестве опорной, задается ω_{ref} . Системная частота ω_{oj} рассчитывается для отдельных узлов в соседстве с i -м узлом. Из рисунка 2а следует, что k_{pf} и k_{if} – это коэффициенты усиления ПИ-регулятора, используемые для восстановления вторичной частоты. Кроме того, k_{pv} и k_{iv} представляют собой коэффициенты усиления ПИ-регулятора для восстановления напряжения. Корректирующий член, используемый для задания частоты i -го узла, может быть записан как $\delta\omega_i$, а h_i – коэффициент усиления, который имеет ненулевое значение для первичного узла. Метод регулирования напряжения выражается следующим образом:

$$\begin{cases} \delta V_i(k+1) = k_{pv}e_{vi}(k) + k_{iv} \sum_{i=ko}^k e_{vi}(k) \\ e_{vi}(k+1) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(v_{oj}(k) - v_{oi}(k)) + h_i(v_{ref}(k) - v_{oi}(k)) \end{cases} \quad (25)$$

где v_{nom} представляет собой номинальное значение опорного напряжения для системы МС на единицу (о.е.), а v_{oj} – напряжение в системе для узлов, соседних с узлом i . Элементы коррекции напряжения δV_i добавляются к опорному напряжению i -го инвертора. Коэффициент усиления закрепления представлен как g_i , который имеет ненулевое значение для основного узла.

6. Моделирование микросети при вторичных задержках управления

Предложенная стратегия распределенного управления была проанализирована с помощью математического анализа структуры управления [38,39,42], как показано на рисунке 1. Модель МС с малым сигналом строится с возмущением уравнений с большим сигналом. В этом разделе рассматриваются компоненты модели системы МС, которые использовались при проектировании системы и для анализа устойчивости структуры управления.

6.1. Управление первичным разделением мощности

На рисунке 3а описана схема разделения мощности, модель малого сигнала которой может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{P} \\ \Delta \dot{Q} \end{bmatrix} &= A_p \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} + B_p \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta v_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} + B_{p\omega com}[\Delta \omega_{com}] \\ \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta v_{odq}^* \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_{p\omega} \\ C_{pv} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (26)$$

где матрицы A_p , $B_{p\omega com}$, B_p , C_{pv} и $C_{p\omega}$ имеют дополнительные переменные, особенности которых приведены в приложениях А и В. Регуляторы мощности обеспечивают рабочую частоту (ω_i) и опорные напряжения (в виде компонентов: v_{odi}^* , v_{oqi}^*) для распределенного узла, которые питают регуляторы

напряжения, где v_{oqi}^* имеет нулевое опорное значение [18]. Ошибка, возникающая при расчете и оценке среднего значения в любой момент времени, может быть выражена как изменение вводимой мощности.

$$[\Delta P_i] = [\bar{P}_i] - [P_i] \quad (27)$$

где P_i – усредненная оценка активной мощности в конкретном узле i , а P_i – активная мощность, рассчитанная контуром управления мощностью.

Изменения тока в линии, тока нагрузки и параметров инвертора под действием этих возмущений теперь записываются как:

$$\begin{aligned} [\Delta \dot{i}_{linedq}] &= A_{net}[\Delta i_{linedq}] + B_{1net}[\Delta \dot{v}_{dqi}] + B_{1net}[\Delta \dot{\omega}_i] \\ [\Delta \dot{i}_{loaddq}] &= A_{load}[\Delta i_{linedq}] + B_{1load}[\Delta \dot{v}_{dqi}] + B_{2load}[\Delta \dot{\omega}_i] \end{aligned} \quad (28)$$

Вариации параметров обновляются как:

$$\begin{aligned} [\Delta \dot{x}_{invi}] &= A_{invi}[\Delta x_{invi}] + B_{invi}[\Delta \dot{v}_{dqi}] + B_{i\omega com}[\Delta \dot{\omega}_i + \Delta \omega_{com}] \\ \begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_i + \Delta \omega_{com} \\ \Delta i_{odqi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_{inv\omega i} \\ C_{invci} \end{bmatrix} [\Delta x_{invi}] \end{aligned} \quad (29)$$

Вектор состояния выглядит следующим образом:

$$[\Delta x_{inv}] = [\Delta \delta_i \quad \Delta P_i \quad \Delta Q_i \quad \Delta \phi_{dqi} \quad \Delta \zeta_{dqi} \quad \Delta i_{ldqi} \quad \Delta v_{odqi} \quad \Delta i_{odqi}]^T \quad (30)$$

где матрицы A_{1net} , B_{1net} , A_{load} , B_{1load} , B_{2load} , A_{invi} , B_{invi} , $B_{i\omega com}$, $C_{inv\omega i}$ и C_{invci} приведены в приложениях А и В.

6.2. Составная полная модель микросети.

Уравнение (31) представляет собой совместную модель для N числа силовых электронных преобразователей, сопряженных с микросетью.

$$\begin{aligned} [\Delta x_{inv}] &= A_{inv} \cdot [\Delta x_{inv}] + B_{inv} \cdot [\Delta v_{bDQ}] \\ [\Delta i_{oDQ}] &= C_{inv} \cdot [\Delta x_{inv}] \end{aligned} \quad (31)$$

где вектор состояния $[x_{inv}] = [\Delta x_{inv1} \quad \Delta x_{inv2} \quad \dots \quad \Delta x_{invN}]^T$ и $[\Delta v_{bDQ}] = [\Delta v_{bDQ1} \quad \Delta v_{bDQ2} \quad \dots \quad \Delta]^T$.

Распределительная микросеть и нагрузка системы могут быть смоделированы с помощью законов Кирхгофа. Что касается линейных токов и напряжений в узлах, то эта модель представлена в уравнениях (32)-(34).

$$\begin{aligned} [\Delta \dot{i}_{lineDQ}] &= A_{NET}[\Delta i_{lineDQ}] + B_{1NET}[\Delta \dot{v}_{edqi}] + B_{1NET}[\Delta \dot{\omega}_{ei}] \\ [\Delta \dot{i}_{loadDQ}] &= A_{LOAD}[\Delta i_{loadDQ}] + B_{1LOAD}[\Delta \dot{v}_{edqi}] + B_{2LOAD}[\Delta \dot{\omega}_{ei}] \end{aligned} \quad (32)$$

где

$$\begin{cases} \Delta i_{lineDQ} = [\Delta i_{lineDQ1}, \Delta i_{lineDQ2}, \dots, \Delta i_{lineDQn}]^T \\ \Delta i_{loadDQ} = [\Delta i_{loadDQ1}, \Delta i_{loadDQ2}, \dots, \Delta i_{loadDQp}]^T \\ \Delta v_{bDQ} = [\Delta v_{bDQ1}, \Delta v_{bDQ2}, \dots, \Delta v_{bDQm}]^T \\ \Delta \omega = \Delta \omega_{com} \end{cases} \quad (33)$$

и

$$\left. \begin{aligned} A_{Net} &= \text{Diag} [A_{Net1}, A_{Net2} \quad \dots \quad A_{NetN}]_{2n \times 2n} \\ B_{2Net} &= [B_{2Net1}, B_{2Net2} \quad \dots \quad B_{2NetN}]_{2n \times 1}^T \\ B_{1Net} &= [B_{1Net1}, B_{1Net2} \quad \dots \quad B_{1NetN}]_{2n \times 2m}^T \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Вышеупомянутые модели компонентов связаны между собой для получения полной модели малых сигналов, которая представлена в уравнениях (35) и (36). Детали используемой системы могут быть описаны следующим образом: s = четыре ОПГ, m = пять узлов, n = пять линий и p = три нагрузки. Для решения системы используются Simulink и MATLAB.

7. Устойчивость системы МС

Анализ устойчивости МС проводится путем изменения задержек связи и коэффициентов усиления. Кроме того, с помощью этой модели получены предельные значения для протестированной сети МС с разработанной методикой управления. Временные задержки для определенных пар линий связи между узлами (a_{14} , a_{41}) и (a_{34} , a_{43}) изменяются постепенно, чтобы измерить влияние на полюса и нули МС.

Влияние изменений n_{Qi} и m_{Pi} , коэффициентов усиления управления реактивной и активной мощностью, соответственно, показано на рисунках 4а-d. Влияние изменения m_{Pi} и n_{Qi} при исследуемом подходе распределенного усреднения можно наблюдать на рисунке 4 а, b. На рисунках 4 с, d показано влияние вариации при обычном подходе на основе управления согласующих воздействий.

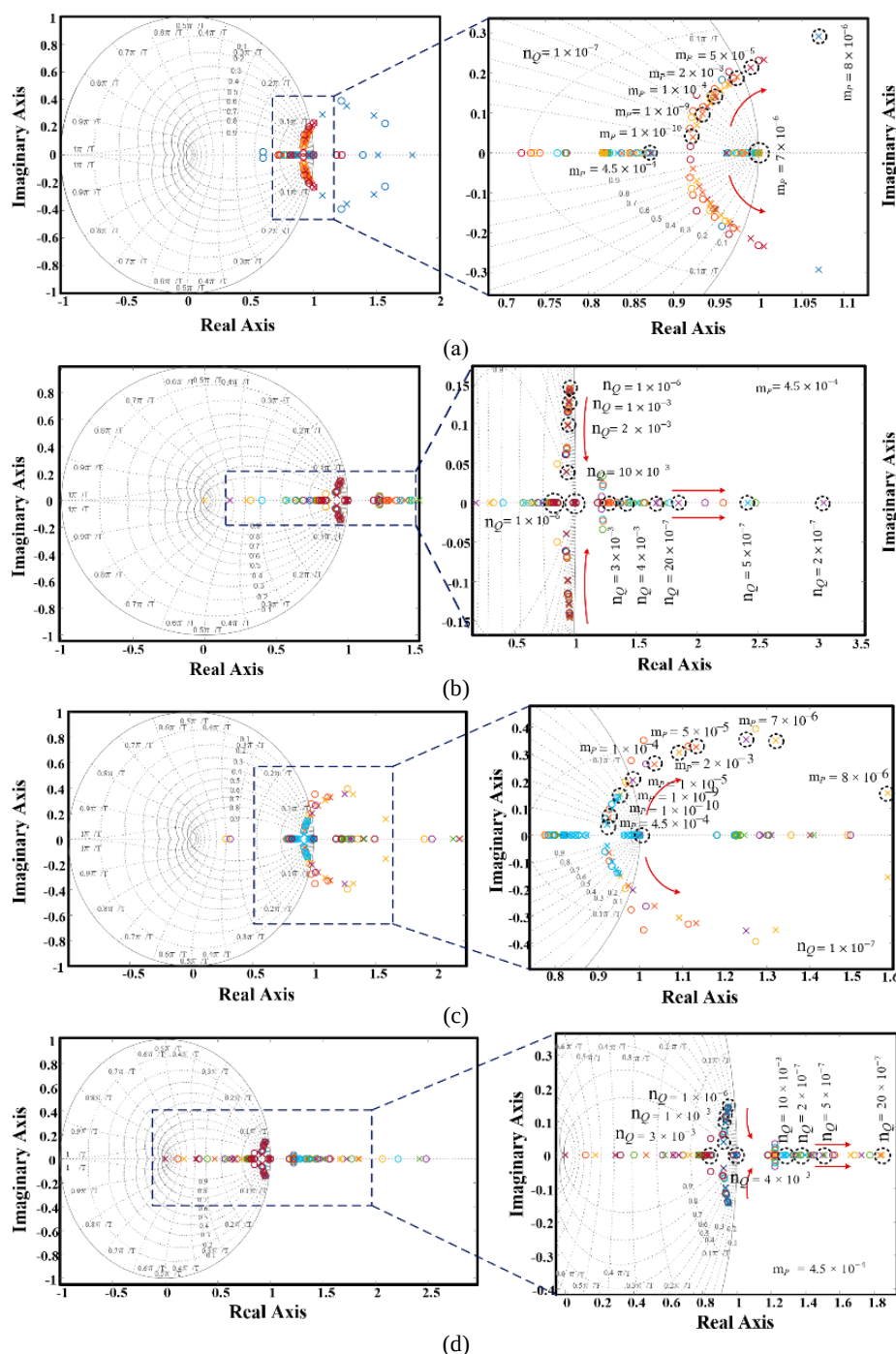


Рис. 4. Сравнение стабильности при использовании предложенного и других методов.

- (а) Эффект вариации m_P с предложенными средними оценками; (б) вариация n_Q с предложенными средними оценками;
- (с) вариация m_P с наблюдателями, основанными на управлении согласующих воздействий;
- (d) вариация n_Q с наблюдателями, основанными на управлении согласующих воздействий

Управляющие переменные (m_{pi} , n_{qi}), при которых полюса системы существуют в диапазоне границы единичного круга, являются максимально допустимым пределом для определения устойчивости системы. Таким образом, по расположению полюсов и нулей можно предсказать коэффициент усиления управления и характеристики системы. По сравнению с традиционными схемами, основанными на управлении согласующих воздействий, исследуемая методика значительно повышает устойчивость системы при вариациях коэффициента усиления управления первичного уровня. Было обнаружено, что система более чувствительна к изменениям n_{qi} , чем m_{pi} , что приводит к тому, что управление реактивной мощностью работает с меньшим запасом устойчивости. Эксплуатационные ограничения приведены в таблице 3.

Таблица 3

Диапазон изменения для регуляторов с временными задержками

Серийный №.	Параметры управления	Минимум	Максимум
1.	Регулятор мощности		
	Активная мощность: m_p	1×10^{-10}	1×10^{-3}
	Реактивная мощность: n_q	1×10^{-7}	1×10^{-3}
2.	Регулирование частоты		
	k_{pf}	0,45	2,55
	k_{if}	0,14	0,53
3.	Регулирование напряжения		
	k_{pV}	0,51	3,52
	k_{iV}	0,15	0,53
4.	Временная задержка связи: τ_{delay}	0	2 s

Поведение системы МС с предложенной методикой и существующими методами разделения мощности при изменении значений временных задержек показано с помощью полюсных и нулевых трасс на рисунке 5а-d. Можно отметить, что по сравнению с принципиально управлением согласующих воздействий предложенная схема повышает устойчивость системы при возникновении коммуникационных задержек в системе МС. Таким образом, можно утверждать, что предложенный метод с использованием распределенных средних обеспечивает большую степень устойчивости системы МС по сравнению с существующим управлением, когда система сталкивается со сбоями связи и задержками.

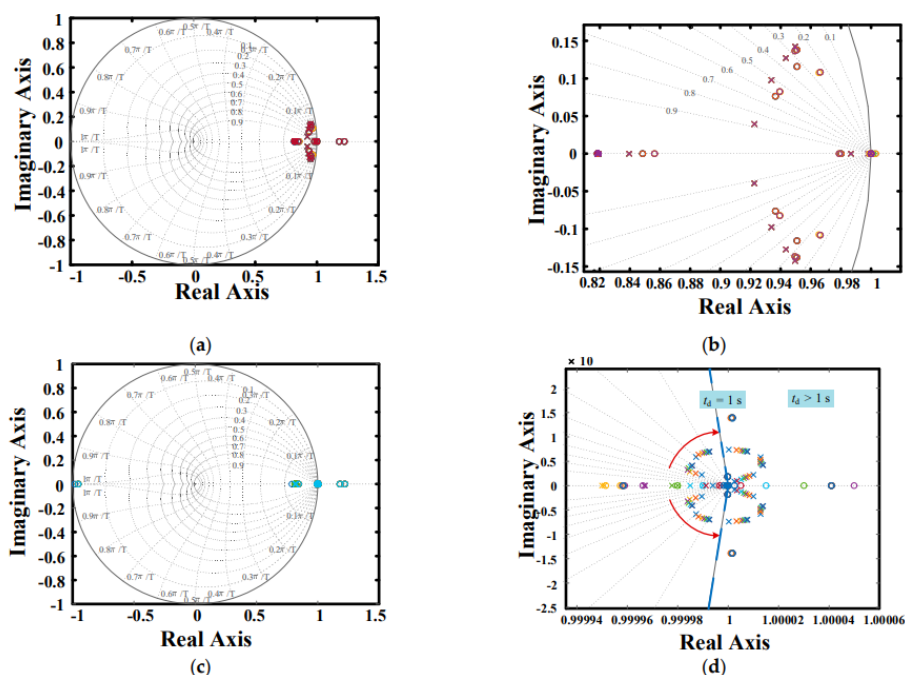


Рис. 5. Сравнительное влияние временной задержки на устойчивость системы.

- (а) Предлагаемый метод распределенного усреднения; (б) Метод распределенного усреднения (увеличено);
 (с) Оценка значений на основе управления согласующих воздействий;
 (д) Метод оценки значений на основе управления согласующих воздействий (увеличено)

8. Примеры исследований

Для анализа устойчивости системы МС были проведены тщательные исследования на основе моделирования в MATLAB и Simulink, результаты которых представлены в данном разделе. Для моделирования задержек связи в двух каналах, соединяющих ОРГ-4, оцениваются два различных случая временной задержки. Структура управления направлена на достижение МС-управления восстановлением напряжения и частоты системы, а также равномерного распределения мощности между узлами, как показано на рисунках 6 и 7. Эти результаты показывают, что предложенный подход к управлению на основе распределенного усреднения работает лучше, чем традиционный метод. Как и в случае управления на основе согласующих воздействий, временные задержки приводят к значительному отклонению управляемых параметров. Однако при тех же задержках предложенный метод обеспечивает эффективное распределение мощности между узлами системы. Результаты представлены в следующих подразделах.

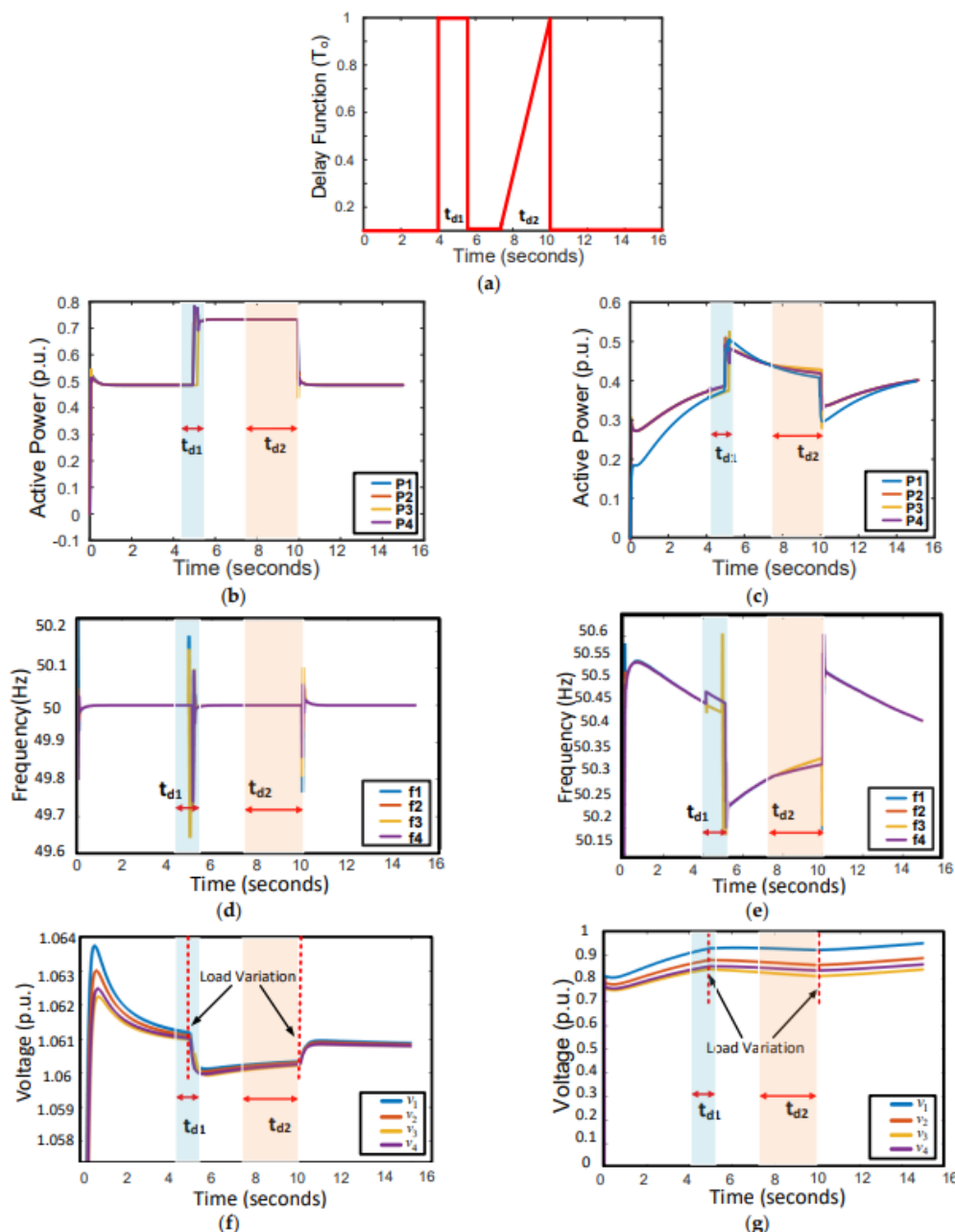


Рис. 6. Работа схем управления при временных задержках. (a) Временные задержки; (b) Распределение активной мощности с использованием предложенного метода; (c) Распределение активной мощности с использованием метода управления согласующих воздействий; (d) Восстановление частоты с использованием предложенного метода; (e) Восстановление частоты с использованием метода управления согласующих воздействий; (f) Восстановление напряжения с использованием предложенного метода; (g) Восстановление напряжения с использованием метода управления согласующих воздействий

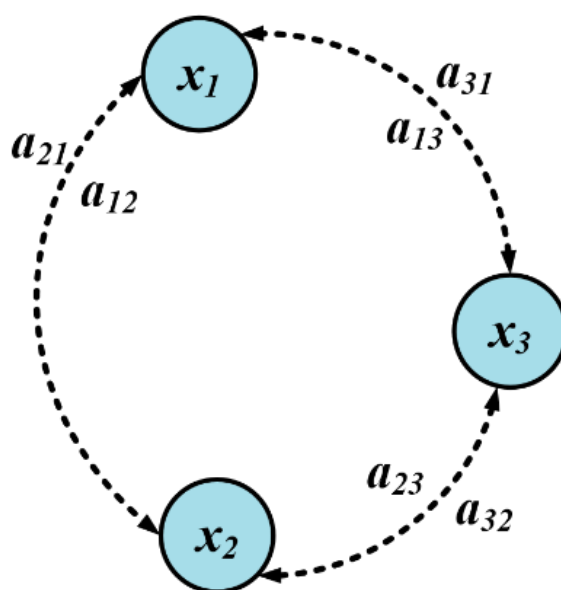
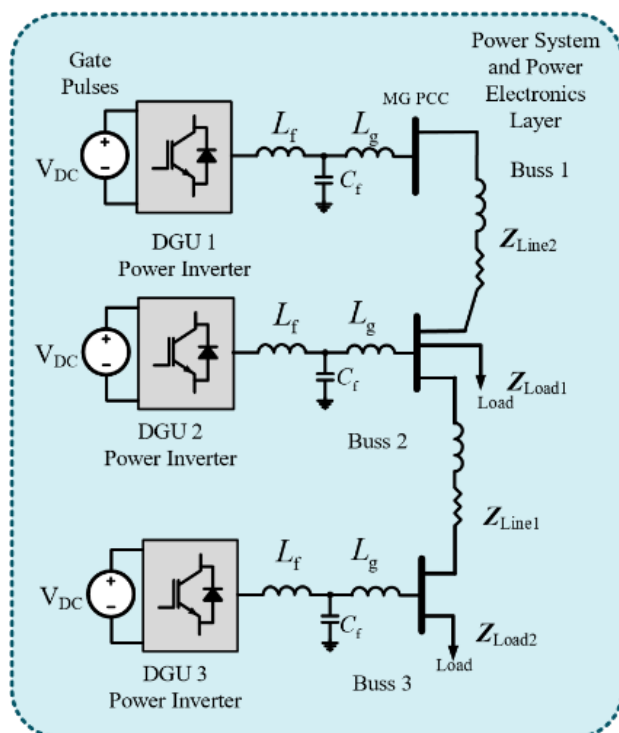


Рис. 7. Схема эксперимента. (а) Экспериментальная установка; (б) Структура коммуникационной сети

8.1. Активное распределение мощности

Подход с активным разделением мощности оценивается в сравнении со схемой наблюдателя согласующих воздействий, как представлено в уравнении (20). На рисунке 2b показаны узлы связи, где все узлы связаны как минимум с двумя участвующими узлами. Отказ канала связи или задержки были рассмотрены в четырех каналах a_{14} , a_{41} , a_{34} и a_{43} , что приводит к задержке данных, передаваемых и направляемых в ОРГ-4 и из ОРГ-4, как показано на рисунке 2с. Результаты распределения активной мощности по исследуемой схеме с задержками в каналах связи и управлением на основе управления согласующих воздействий представлены на рисунке 6а,б. Предложенный подход показывает меньшие погрешности за более короткий период и приводит систему к правильным значениям за короткое время (1 с по сравнению с 5 с в случае существующих методов, основанных на управлении согласующих воздействий), в то время как в случае подхода с согласующими воздействиями можно заметить значительное отклонение в инжектируемой мощности.

8.2. Регулирование частоты

На рис. 6 d, e показаны результаты восстановления частоты при использовании предложенного метода и управления согласующими воздействиями, соответственно. Замечено, что при использовании предложенной схемы управления восстановление частоты до желаемого значения может быть достигнуто за гораздо меньшее время по сравнению с существующими методами, основанными на управлении согласующих воздействий.

8.3. Регулирование напряжения

На рисунках 6 f, g показаны результаты восстановления напряжения с помощью предложенной схемы и метода, соответственно, основанного на управлении согласующих воздействий. Из рисунков видно, что схема, основанная на управлении согласующих воздействий, демонстрирует большее расхождение в напряжениях узлов, в то время как восстановление напряжения может быть достигнуто без заметных отклонений напряжения узлов с помощью мультиагентного метода оценки скользящего среднего.

В предложенной здесь схеме управления все участвующие преобразователи в системе МС поддерживают управление согласующих воздействий между узлами, чтобы желаемые корректирующие значения для $P_{ref,i}$, ω_i и V_i направляли систему МС на реализацию цели управления за конечное время. При использовании метода, полностью основанного на управлении согласующих

воздействий, системе МС требуется больше времени для сходимости напряжения и частоты. Из представленных результатов моделирования можно отметить, что предложенная методика показала лучшую устойчивость, когда система страдает от задержек связи, и цели управления МС, такие как точное распределение мощности между узлами и восстановление частоты и напряжения, могут быть реализованы за конечное время.

8.4. Меняющиеся во времени задержки в коммуникационной системе микросети

В этом разделе рассматривается влияние изменяющихся во времени задержек в сети связи, а также других переходных процессов. Рассматривается несколько задержек в сети связи, влияющих на ОРГ-4 сети связи (т.е. a_{14} , a_{41} , a_{34} и a_{43}). Один из узлов-участников периодически отключается от соседних узлов-агентов. Переходные процессы нагрузки исследуются на трех из четырех шин системы. Приведены временные вариации. Информационный сигнал задерживается на $T_o(t)$, где T_o представляет собой изменяющуюся во времени задержку, как показано на рисунке 3а. Обобщенная функция задержки для представления задержанного сигнала представлена так, что $y(t) = u(t - T_o(t))$. Здесь $u(t - T_o(t))$ – это функция задержки на входе системы, а функция задержки на выходе представлена $y(t)$ [43]. Рассматриваются два вида переменных задержек: t_{d1} представляет собой шаговую задержку, которая длится одну секунду и начинается в момент времени $t = 4,15$ с; в момент $t = 5,15$ с линии связи были переподключены. Кроме того, t_{d2} представляет собой функцию нарастания, начинающуюся в момент времени $t = 7,5$ с, которая достигает максимума в момент времени $t = 10$ с, а затем резко снижается до нуля. Изменение нагрузки в 0,3 о.е. было добавлено в момент времени $t = 5$ с на шину 2 и шину 3. При $t = 10$ с эти дополнительные нагрузки удаляются. Результаты моделирования распределения активной мощности, полученные при этих испытаниях с использованием предложенного подхода, и результаты, полученные при использовании традиционного управления на основе управления согласующих воздействий, показаны на рисунках 4 б, с. На рисунках 4 д, е сравниваются результаты восстановления частоты, достигнутые при использовании предложенного метода и традиционных методов управления на основе управления согласующих воздействий, соответственно. На рисунке 4 ф, г представлены результаты восстановления напряжения. Сравнивая вышеупомянутые рисунки, можно заметить, что устойчивость предложенной стратегии управления превосходит существующие схемы, основанные на управлении согласующих воздействий, когда система МС находится в условиях задержек связи и сценариев отказа линий. В этих сценариях предложенная схема управления может эффективно распределять активную мощность между узлами, а время сходимости значительно меньше, чтобы достичь номинальных значений напряжения и частоты МС.

9. Экспериментальные результаты

В этом разделе представлены экспериментальные результаты и проверка стратегии управления с использованием мультиагентных скользящих средних оценок, описанной в данной статье. Мы реализовали лабораторную микросеть с преобразователями постоянного тока и переменного тока и регулируемые R-L нагрузками. Упрощенные R-L сопротивления добавлены для эмуляции линий передачи, как показано на рисунке 7. Установка состоит из трех инверторов мощностью 60 кВА каждый, источников питания постоянного тока, резистивных и индуктивных нагрузок. В целях безопасности эксперимента и защиты оборудования они работали только при максимальном уровне максимального уровня напряжения 100 В и тока – 20 А. Чтобы избежать токов утечки, нейтральная точка остается плавающей. Управление преобразователями осуществляется через специализированную плату управления, в которую встроены микрорегуляторный блок TMS320F28346 Delfino, комплексное программируемое логическое устройство EPM570 ALTERA и аналого-цифровые преобразователи. Эмуляция информационного сетевого уровня осуществляется с помощью каналов Ethernet (IEEE 802.3) и сетевого коммутатора. С разумным компромиссом и без большой потери общности эмулируются схемы распределенного кооперативного управления путем их реализации в централизованном регуляторе. Задержки в каналах связи эмулируются в программном обеспечении LabVIEW®, которое обрабатывает управление более высокого уровня и информацию, проходящую через сеть. Результаты распределения мощности, регулирования напряжения и частоты были получены с помощью программы LabVIEW, а осциллограммы напряжения и тока на клеммах инвертора – с помощью цифровых осциллографов Tek MDO3000

и RIGOL DS1052E. Схема системы показана на рисунке 7а, а схема коммуникаций, эмулируемая в программном обеспечении, – на рисунке 7b. Параметры, использованные в эксперименте, приведены в таблице 4, а физическая схема показана на рисунке 8.

Таблица 4

Экспериментальные параметры управления

Параметры		Обозначение	Значения
Частота системы (номинальная)		f^*	50 Hz
Напряжение системы (номинальное)		V^*	100 V
Частота коммутации		f_s	16 kHz
Напряжение звена постоянного тока		V_{DC}	150 V
Регуляторы нулевого уровня	Регулятор контура напряжения	K_{pV1}	23
		K_{iV1}	55
	Регулятор контура тока	K_{pC1}	42
		K_{iC1}	110
Первичные регуляторы	Активный регулятор мощности	m_{p1}	0.0035 рад/Вт
	Реактивный регулятор мощности	n_{Q1}	10^{-4} рад /BA
Вторичные регуляторы	Восстановительный регулятор напряжения	K_{pVr}	2,5
		K_{iVr}	0,5
	Частотный восстановительный регулятор	K_{pfr}	3,5
		K_{irf}	0,8
Квазисредний наблюдатель		a	0.7
Задержка связи		t_d	10 мс (мин)–2000 мс (макс)

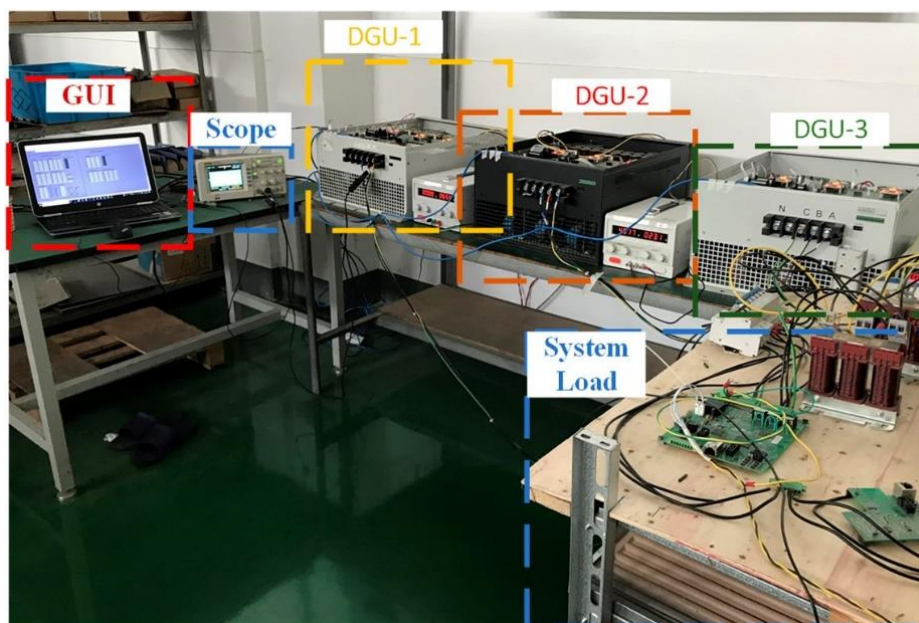


Рис. 8. Экспериментальная установка

9.1. Распределение активной мощности

Производительность регулятора активного распределения мощности между ОРГ получена с помощью модулей Ethernet через платформу управления и наблюдения, разработанную в LabVIEW. Изначально нагрузка системы составляет 300 Вт (100 Вт/ОРГ). При $t = 6$ с потребность в активной мощности возрастает примерно до 1360 Вт (453 Вт/ОРГ). Как видно из рисунка 9а, при использовании методов с понижением и обычного управления согласующих воздействий распределение мощности достигается за больший промежуток времени. Напротив, при использовании предложенной схемы оценочных наблюдателей распределение мощности достигается за более

короткий промежуток времени и является более точным, как показано на рис. 9b. При использовании обоих методов управления достигается активное распределение мощности. Однако, при использовании методов, основанных на понижении управляющих воздействий, активное распределение мощности между ОРГ достигается за больший промежуток времени и более чувствительно к задержкам связи, в то время как при использовании предлагаемых методов управления активное распределение мощности достигается за более короткий промежуток времени.

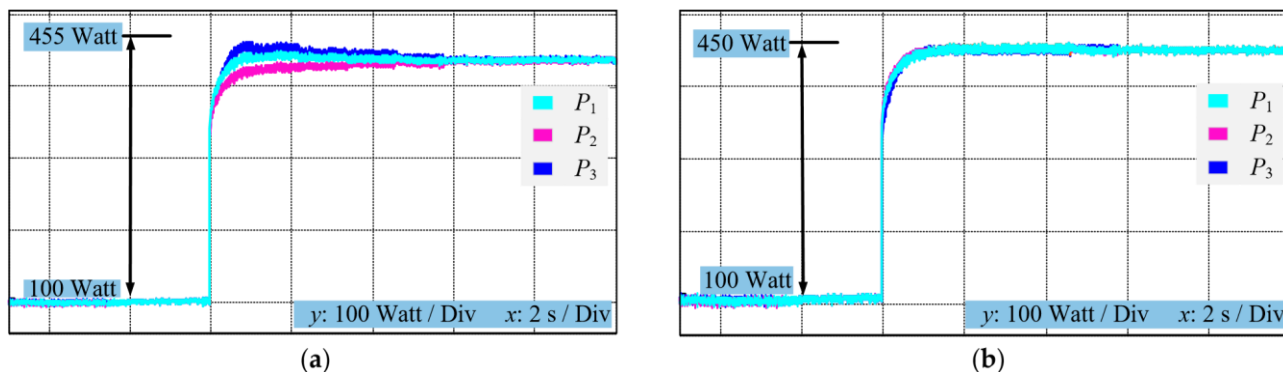


Рис. 9. Производительность регуляторов распределения мощности.

(a) Управление на основе управления согласующих воздействий; (b) предлагаемое управление на основе наблюдателя

9.2. Восстановление частоты

В этом разделе представлены результаты восстановления частоты для предложенного метода управления в сравнении с обычным методом управления на основе управления согласующих воздействий. Временная задержка $t_d = 250$ мс эмулируется с помощью сети, эмулируемой в LabVIEW. На рис. 10a представлены результаты регулирования частоты с помощью предложенного метода. Видно, что благодаря действию предложенных средних оценок в схеме управления, динамика восстановления частоты значительно улучшается. После переходного процесса изменения нагрузки, вызвавшего отклонение частоты, частота восстанавливается до номинального значения 50 Гц в течение 300 мс. На рис. 10b приведены результаты регулирования частоты с помощью обычной схемы управления на основе управления согласующих воздействий. Видно, что частота системы зависит от отклонений и неточностей при наличии задержек связи. Переходные процессы, вызванные изменением нагрузки, еще сильнее ухудшают восстановление частоты.

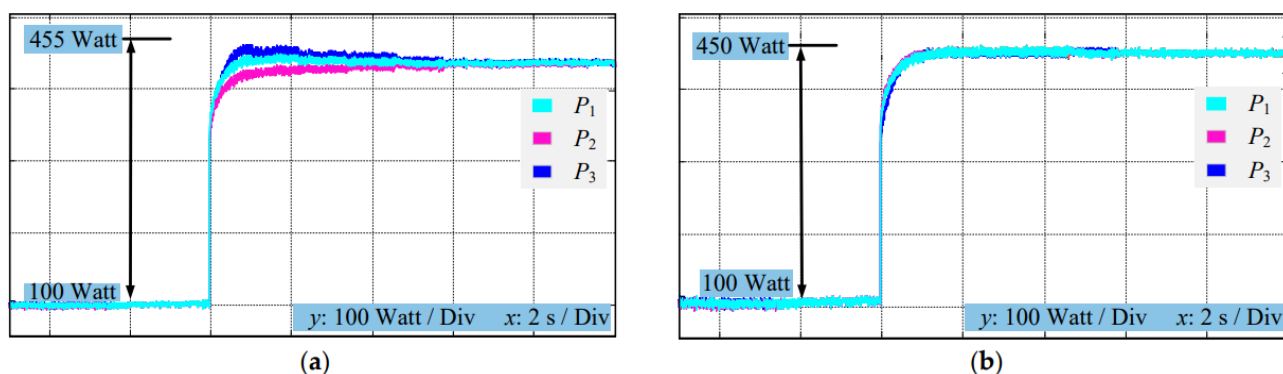


Рис. 10. Частотные характеристики регуляторов.

(a) Восстановление частоты с помощью предложенного метода управления;
(b) Восстановление частоты с помощью управления согласующих воздействий

10. Сравнение с другими стратегиями управления

Чтобы убедиться в жизнеспособности предложенной схемы, в этом разделе приводится всестороннее сравнение предложенной схемы управления с традиционным подходом, основанным на управлении согласующих воздействий. Мультиагентные структуры управления на основе управления согласующих воздействий, рассмотренные в [19, 26, 27, 30, 33], требуют взаимной синхронизации между наблюдателями участвующего узла для достижения цели совместного управления. Все эти вышеупомянутые методы сильно зависят от состояния коммуникационной сети, чтобы можно было достичь

желаемой сходимости в параметрах МС. Схемы управления на основе управления согласующих воздействий основаны на интегральных функциях, которые используют коллективную минимизацию ошибок. Задержки связи вызывают локализованные ошибки, которые увеличиваются из-за интегрального эффекта регуляторов системы управления согласующих воздействий, и значения системы расходятся, как можно наблюдать на рисунке 6 b, d, f и рисунке 7 c, e, g. Напротив, в предлагаемой в данной работе схеме в качестве номинального значения эталонов принимаются значения средних оценок, которые вычисляются с помощью распределенных усредняющих наблюдателей. Предложенный метод оценки устойчив к задержкам связи при передаче данных, как видно из рисунка 6 a, c, e и рисунка 7 b, c, e. В таких сценариях, как отказ канала связи и задержки, производительность предложенной стратегии управления сравнивается с существующими схемами управления, и видно, что сходимость к устойчивым состояниям в этих сценариях может быть достигнута за короткий промежуток времени, что показывает, что предложенная схема является более устойчивой. Предложенная схема управления продемонстрировала более высокую надежность системы в нескольких аспектах по сравнению с традиционными схемами управления на основе управления согласующих воздействий, как показано в таблице 5.

Таблица 5

Сравнение схем управления по задержкам передачи данных

Сравнительные параметры	Предлагаемый мультиагентный метод скользящего среднего	Методы, основанные на управлении согласующих воздействий [18, 25, 26, 29, 32]
Совместное использование активной мощности	Сходимость достигается на небольшом временном интервале	Сходимость на большем временном интервале
Изменения напряжения	Наблюдаются небольшие колебания, которые затухают за небольшой промежуток времени	Бóльшие вариации, которые распадаются за более длительный период времени
Изменения частоты	Наблюдаются небольшие колебания, которые затухают за небольшой промежуток времени	Бóльшие вариации, которые затухают за более длительный период времени
Сходимость: частота	Достигается за малое время	Достигается за среднее время
Конвергенция: напряжение	Достигается за малое время	Достигается за большее время

11. Выводы

В данной работе предлагается новый мультиагентный оценщик скользящего среднего для наблюдения за распределенными значениями системы и, таким образом, уменьшения влияния задержек связи в сети связи и управления. Эти оценки включены в иерархическую структуру управления, которая регулирует параметры системы с помощью активного распределения мощности и регулирования напряжения и частоты. Для системы МС построены математические модели для предложенного метода и других традиционных методов, основанных на управлении согласующих воздействий. Жизнеспособность и превосходство предложенной схемы над другими традиционными методами демонстрируется с помощью анализа устойчивости, полученного на основе этих математических моделей. В MATLAB проведены подробные имитационные исследования конкретных случаев и сравнение результатов для этих схем управления. Кроме того, для проверки результатов имитационного моделирования используется лабораторный экспериментальный стенд. Принятые методы проверки в совокупности подтверждают эффективность предложенной схемы управления и ее превосходство над другими традиционными схемами управления. Предложенный метод управления более устойчив к возмущениям, вызванным задержками связи, и демонстрирует более раннюю сходимость по сравнению с традиционными методами, основанными на управлении согласующих воздействий.

Вклад авторов: концептуализация, У.Дж.А., К.Х., М.Т.Ф., А.Ф. и М.А.М.; методология, У.Дж.А., К.Х., М.Т.Ф., А.Ф. и М.А.М.; валидация, У.Дж.А.; формальный анализ, К.Х., М.Т.Ф., А.Ф. и М.А.М.; исследование, У.Дж.А., К.Х. и С.К.; написание первоначального проекта, У.Дж.А., К.Х., М.Т.Ф., А.Ф. и М.А.М.; написание-рецензирование и редактирование, У.Дж.А., К.Х., М.Т.Ф., А.Ф., С.К., М.А.М. и Д.А.У.; наблюдение, М.А.М.; получение финансирования, С.К. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление Совета по институциональному надзору: Не применимо.

Заявление об информированном согласии: Не применимо.

Заявление о доступности данных: Не применимо.

Конфликты интересов: Авторы не заявляют о конфликте интересов.

Системные матрицы

$$\begin{aligned}
A_{NETi} &= \begin{bmatrix} \frac{-r_{linei}}{L_{linei}} & \omega_0 \\ -\omega_0 & \frac{-r_{linei}}{L_{linei}} \end{bmatrix} \\
A_{Loadi} &= \begin{bmatrix} \frac{-R_{Loadi}}{L_{Loadi}} & \omega_0 \\ -\omega_0 & \frac{-R_{Loadi}}{L_{Loadi}} \end{bmatrix} \\
B_{NETi} &= \begin{bmatrix} I_{lineQi} \\ -I_{lineQi} \end{bmatrix} \\
B_{1NETi} &= \begin{bmatrix} \dots & \frac{1}{L_{linei}} & 0 & \dots & \frac{-1}{L_{linei}} & 0 & \dots \\ \dots & 0 & \frac{1}{L_{linei}} & \dots & 0 & \frac{-1}{L_{linei}} & \dots \end{bmatrix}_{2 \times 2m} \\
B_{1Loadi} &= \begin{bmatrix} \dots & \frac{1}{L_{Loadi}} & 0 & \dots & \frac{-1}{L_{Loadi}} & 0 & \dots \\ \dots & 0 & \frac{1}{L_{Loadi}} & \dots & 0 & \frac{-1}{L_{Loadi}} & \dots \end{bmatrix}_{2 \times 2m} \\
B_{2Loadi} &= \begin{bmatrix} I_{LoadQi} \\ -I_{LoadDi} \end{bmatrix} \\
A_{MG} &= \begin{bmatrix} A_{mg1} & B_{inv} R_N M_{Net} & B_{inv} R_N M_{Load} \\ A_{mg2} & A_{Net} + B_{1Net} R_N M_{Net} & B_{1Net} R_N M_{Load} \\ A_{mg3} & B_{1Load} R_N M_{Net} & A_{load} + B_{1Load} R_N M_{Load} \end{bmatrix} \\
A_{mg1} &= A_{inv} + B_{inv} R_N M_{inv} C_{inv} \\
A_{mg2} &= B_{1Net} R_N M_{inv} C_{inv} + B_{2Net} C_{inv} \\
A_{mg3} &= B_{1Load} R_N M_{inv} C_{inv} + B_{2Load} C_{inv} \\
rp_{ki} &= \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \\
A_{invi} &= \begin{bmatrix} A_{Pi} & 0 & 0 & B_{Pi} \\ B_{V1i} C_{Pvi} & 0 & 0 & B_{V2i} \\ B_{C1i} D_{V1i} C_{Pvi} & B_{C1i} C_{Vi} & 0 & B_{C1i} D_{V2i} + B_{C2i} \\ B_{LCL1i} D_{C1i} D_{V1i} C_{Pvi} + B_{LCL1i} D_{C1i} C_{Vi} & B_{LCL1i} C_{Ci} & & A_{LCLi} + \\ B_{LCL2i} [T_{Vi}^{-1} 00] & & & B_{LCLi} (D_{C1i} D_{V2i} + D_{C2i}) \end{bmatrix}_{13 \times 13} \\
B_{i\omega com} &= [B_{P\omega com} \ 0 \ 0 \ 0]_{13 \times 1}^T \\
C_{INV\omega i} &= \begin{cases} [C_{P\omega} \ 0 \ 0 \ 0]_{1 \times 13}, i = 1 \\ [0 \ 0 \ 0 \ 0]_{1 \times 13}, i \neq 1 \end{cases} \\
A_P &= \begin{bmatrix} 0 & -m_P & 0 \\ 0 & -\omega_c & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_c \end{bmatrix}, B_{P\omega com} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} B_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_c I_{od} & \omega_c I_{oq} & \omega_c V_{od} & \omega_c I_{oq} \\ 0 & 0 & \omega_c I_{oq} & -\omega_c I_{od} & -\omega_c V_{oq} & \omega_c V_{od} \end{bmatrix} \\
C_{P\omega} &= [0 \ -m_P \ 0], C_{Pv} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -n_Q \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

where A_{invi} , B_{invi} , $C_{INV\omega i}$, and $B_{i\omega com}$ represent sub-matrices.

где A_{invi} , B_{invi} , $C_{INV\omega i}$, и $B_{i\omega com}$ представляют подматрицы.

Приложение В.1. Матрица смежности

$$A_g = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Приложение В.2. Матрица степеней

$$D_g = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Приложение В.3. Матрица лапласиана

$$\Lambda_g = D_g - A_g = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{pmatrix}$$

ЛИТЕРАТУРА

- Guerrero, J.M.; Chandorkar, M.; Lee, T.L.; Loh, P.C. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids part i: Decentralized and Hierarchical Control. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013, 60, 1254–1262. <http://doi.org/10.1109/TIE.2012.2194969>
- Ramos, F.; Pinheiro, A.; Nascimento, R.; de Araujo Silva Junior, W.; Mohamed, M.A.; Annuk, A.; Marinho, M.H. Development of Operation Strategy for Battery Energy Storage System into Hybrid AC Microgrids. *Sustainability* 2022, 14, 13765. <http://doi.org/10.3390/su142113765>
- Mohamed, M.A. A relaxed consensus plus innovation based effective negotiation approach for energy cooperation between smart grid and microgrid. *Energy* 2022, 252, 123996. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123996>
- Abouzeid, S.I.; Guo, Y.; Zhang, H. Coordinated Control of the Conventional Units, Wind Power, and Battery Energy Storage System for Effective Support in the Frequency Regulation Service. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2019, 29, e2845. <http://doi.org/10.1002/2050-7038.2845>
- Bharti, D.; De, M. Framework for Multipoint Optimal Reactive Power Compensation in Radial Distribution System with High Distributed Generation Penetration. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2019, 29, e12007. <http://doi.org/10.1002/2050-7038.12007>
- Han, H.; Hou, X.; Yang, J.; Wu, J.; Su, M.; Guerrero, J.M. Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids. *IEEE Trans. Smart Grid* 2016, 7, 200–215. <http://doi.org/10.1109/TSG.2015.2434849>
- Han, Y.; Zhang, K.; Li, H.; Coelho, E.A.A.; Guerrero, J.M. MAS-Based Distributed Coordinated Control and Optimization in Microgrid and Microgrid Clusters: A Comprehensive Overview. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018, 33, 6488–6508. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2761438>
- Han, Y.; Li, H.; Shen, P.; Coelho, E.A.A.; Guerrero, J.M. Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids. *IEEE Trans. Power Electron.* 2017, 32, 2427–2451. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2569597>
- Guerrero, J.M.; Matas, J.; de Vicuna, L.G.; Castilla, M.; Miret, J. Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2007, 54, 994–1004. <http://doi.org/10.1109/TIE.2007.892621>
- Guerrero, J.M.; De Vicuña, L.G.; Matas, J.; Miret, J.; Castilla, M. Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters. *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.* 2004, 2, 1123–1128. <http://doi.org/10.1109/ISIE.2004.1571971>
- Guerrero, J.M.; Matas, J.; De Vicuña, L.G.; Castilla, M.; Miret, J. Wireless-Control Strategy for Parallel Operation of Distributed-Generation Inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2006, 53, 1461–1470. <http://doi.org/10.1109/TIE.2006.882015>
- Guerrero, J.M.; Vásquez, J.C.; Matas, J.; Castilla, M.; García de Vicuna, L. Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2009, 56, 726–736. <http://doi.org/10.1109/TIE.2008.2009274>
- De Brabandere, K.; Bolsens, B.; Van Den Keybus, J.; Woyte, A.; Driesen, J.; Belmans, R. A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters. *IEEE Trans. Power Electron.* 2004, 4, 2501–2507. <http://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355222>
- Alizadeh, E.; Birjandi, A.M.; Hamzeh, M. Decentralised Power Sharing Control Strategy in LV Microgrids under Unbalanced Load Conditions. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2017, 11, 1613–1623. <http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0248>
- Xia, Y.; Peng, Y.; Wei, W. Triple Droop Control Method for Ac Microgrids. *IET Power Electron.* 2017, 10, 1705–1713. <http://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0005>
- Hossain, M.A.; Pota, H.R.; Hossain, M.J.; Blaabjerg, F. Evolution of Microgrids with Converter-Interfaced Generations: Challenges and Opportunities. *Int. J. Electron. Power Energy Syst.* 2019, 109, 160–186. <http://doi.org/10.1016/j.jepes.2019.01.038>

17. Bidram, A.; Nasirian, V.; Davoudi, A.; Lewis, F.L. Droop-Free Distributed Control of AC Microgrids. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 31, 1600–1617. http://doi.org/10.1007/978-3-319-50808-5_6
18. Bidram, A.; Member, S.; Davoudi, A.; Lewis, F.L.; Guerrero, J.M.; Member, S. Distributed Cooperative Secondary Control of Microgrids Using Feedback Linearization. *IEEE Trans. Power Electron.* 2013, 28, 3462–3470. <http://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2247071>
19. Lu, L.Y.; Chu, C.C. Consensus-Based Secondary Frequency and Voltage Droop Control of Virtual Synchronous Generators for Isolated AC Micro-Grids. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.* 2015, 5, 443–455. <http://doi.org/10.1109/JETCAS.2015.2462093>
20. Wang, X.; Zhang, H.; Li, C. Distributed Finite-Time Cooperative Control of Droop-Controlled Microgrids under Switching Topology. *IET Renew. Power Gener.* 2017, 11, 707–714. <http://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0526>
21. Sanjari, M.J.; Gharehpetian, G.B. Unified Framework for Frequency and Voltage Control of Autonomous Microgrids. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2013, 7, 965–972. <http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0761>
22. Shahid, M.U.; Khan, M.M.; Xu, J.; Hashmi, K.; Habib, S.; Mumtaz, M.A.; Tang, H. A Hierarchical Control Methodology for Renewable Dc Microgrids Supporting a Variable Communication Network Health. *Electronics* 2018, 7, 418. <http://doi.org/10.3390/electronics7120418>
23. Lewis, F.L.; Qu, Z.; Davoudi, A.; Bidram, A. Secondary Control of Microgrids Based on Distributed Cooperative Control of Multi-Agent Systems. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2013, 7, 822–831. <http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0576>
24. Liu, W.; Gu, W.; Xu, Y.; Wang, Y.; Zhang, K. General Distributed Secondary Control for Multi-Microgrids with Both PQ-Controlled and Droop-Controlled Distributed Generators. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2017, 11, 707–718. <http://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0613>
25. Zuo, S.; Davoudi, A.; Song, Y.; Lewis, F.L. Distributed Finite-Time Voltage and Frequency Restoration in Islanded AC Microgrids. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2016, 63, 5988–5997. <http://doi.org/10.1109/TIE.2016.2577542>
26. Guo, F.; Wen, C.; Mao, J.; Song, Y.D. Distributed Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Droop-Controlled Inverter-Based Microgrids. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 4355–4364. <http://doi.org/10.1109/TIE.2014.2379211>
27. Agundis-Tinajero, G.; Segundo-Ramírez, J.; Visairo-Cruz, N.; Savaghebi, M.; Guerrero, J.M.; Barocio, E. Power Flow Modeling of Islanded AC Microgrids with Hierarchical Control. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2019, 105, 28–36. <http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.08.002>
28. Lu, X.; Yu, X.; Lai, J.; Guerrero, J.M.; Zhou, H. Distributed Secondary Voltage and Frequency Control for Islanded Microgrids With Uncertain Communication Links. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2017, 13, 448–460. <http://doi.org/10.1109/TII.2016.2603844>
29. Wang, Y.; Wang, X.; Chen, Z.; Blaabjerg, F. Distributed Optimal Control of Reactive Power and Voltage in Islanded Microgrids. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2017, 53, 340–349. <http://doi.org/10.1109/TIA.2016.2615033>
30. Hashmi, K.; Khan, M.M.; Habib, S.; Tang, H. An Improved Control Scheme for Power Sharing between Distributed Power Converters in Islanded AC Microgrids. In Proceedings of the 2017 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT), Islamabad, Pakistan, 18–20 December 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA; pp. 270–275.
31. Hashmi, K.; Mansoor Khan, M.; Jiang, H.; Umair Shahid, M.; Habib, S.; Talib Faiz, M.; Tang, H. A Virtual Micro-Islanding-Based Control Paradigm for Renewable Microgrids. *Electronics* 2018, 7, 105. <http://doi.org/10.3390/electronics7070105>
32. Schiffer, J.; Seel, T.; Raisch, J.; Sezi, T. Voltage Stability and Reactive Power Sharing in Inverter-Based Microgrids with Consensus-Based Distributed Voltage Control. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2016, 24, 96–109. <http://doi.org/10.1109/TCST.2015.2420622>
33. Guan, Y.; Meng, L.; Li, C.; Vasquez, J.; Guerrero, J. A Dynamic Consensus Algorithm to Adjust Virtual Impedance Loops for Discharge Rate Balancing of AC Microgrid Energy Storage Units. *IEEE Trans. Smart Grid* 2017, 3053, 4847–4860. <http://doi.org/10.1109/TSG.2017.2672882>
34. Lai, J.; Zhou, H.; Lu, X.; Yu, X.; Hu, W. Droop-Based Distributed Cooperative Control for Microgrids with Time-Varying Delays. *IEEE Trans. Smart Grid* 2016, 7, 1775–1789. <http://doi.org/10.1109/TSG.2016.2557813>
35. Hashmi, K.; Khan, M.M.; Shahid, M.U.; Nawaz, A.; Khan, A.; Jun, J.; Tang, H. An Energy Sharing Scheme Based on Distributed Average Value Estimations for Islanded AC Microgrids. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2020, 116, 105587. <http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105587>
36. Hashmi, K.; Khan, M.M.; Xu, J.; Shahid, M.U.; Habib, S.; Faiz, M.T.; Tang, H. A Quasi-Average Estimation Aided Hierarchical Control Scheme for Power Electronics-Based Islanded Microgrids. *Electronics* 2019, 8, 39. <http://doi.org/10.3390/electronics8010039>
37. Bidram, A.; Nasirian, V.; Davoudi, A.; Lewis, F.L. *Cooperative Synchronization in Distributed Microgrid Control*, 1st ed.; Grimble, M.J., Ed.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017; ISBN 978-3-319-50807-8.
38. Coelho, E.A.A.; Wu, D.; Guerrero, J.M.; Vasquez, J.C.; Dragičević, T.; Stefanović, Č.; Popovski, P. Small-Signal Analysis of the Microgrid Secondary Control Considering a Communication Time Delay. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2016, 63, 6257–6269. <http://doi.org/10.1109/TIE.2016.2581155>
39. Mahmoud, M.S.; AL-Sunni, F.M. *Control and Optimization of Distributed Generation Systems*, 1st ed.; Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015; ISBN 978-3-319-16909-5.
40. Sheno, B.A. *Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design*, 1st ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2006; ISBN 13 978-0-471-46482-2.
41. Nasirian, V.; Moayedi, S.; Davoudi, A.; Lewis, F.L. Distributed Cooperative Control of Dc Microgrids. *IEEE Trans. Power Electron.* 2015, 30, 2288–2303. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2324579>
42. Mariani, V.; Vasca, F.; Vsquez, J.C.; Guerrero, J.M. Model Order Reductions for Stability Analysis of Islanded Microgrids With Droop Control. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 4344–4354. <http://doi.org/10.1109/TIE.2014.2381151>
43. *Mathworks Simulink Reference*, R2019a ed.; The MatWorks Inc.: Natick, MA, USA, 2019.